

国家“九五”重点图书规划项目

Impact of Asteroid & Palaeoenvironmental Catastrophe
——Study on six Cenozoic bolide-impact events

小天体撞击与古环境灾变

——新生代六次撞击事件的研究

欧阳自远等 著



湖北科学技术出版社

国家“九五”重点图书规划项目

Impact of Asteroid & Palaeoenvironmental Catastrophe

—Study on six Cenozoic bolide-impact events

小天体撞击与古环境灾变

——新生代六次撞击事件的研究

欧阳自远等 著



湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

小天体撞击与古环境灾变:新生代六次撞击事件的研究
/欧阳自远等著. —武汉:湖北科学技术出版社,1997.12.
ISBN 7-5352-1805-9

I. 小… II. 欧… III. ①小行星-撞击(力学)-地球-影响-气候环境-研究-新生代 ②古气候-气候环境-灾害-研究-新生代 IV. Q911.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 19875 号

小天体撞击与古环境灾变

——新生代六次撞击事件研究

◎ 欧阳自远 等著

策 划:汪 敏

封面设计:秦滋宣

责任编辑:汪 敏 陈明涛

出版发行:湖北科学技术出版社

电话:6782508

地 址:武汉市武昌东亭路2号

邮编:430077

印 刷:华中理工大学印刷厂

邮编:430074

督 印:苏江洪

787×1092mm

16 开

11.25 印张

5 插页

272 千字

1997 年 12 月第 1 版

1997 年 12 月第 1 次印刷

印数:0001—1000

ISBN7—5352—1805—9/X·11

定价:23.00 元(精)

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

前言

“均变论”与“突变论”之争贯穿于近代地质学发展的历史。地球演化的历史充分证明,地球化学组成的非均一性与演化的非均变性。灾变事件是地球演化过程中必然的频发过程,突变能否构成事件也因衡量的空间与时间尺度的不同而异,灾变事件对地球演化历史的贡献在时空上也是不均衡的。因此,研究灾变过程及其影响是探讨地球演化过程的有机的组成部分。

太阳系的小天体(小行星、彗星)撞击地球、行星及其卫星,是太阳系各行星与卫星演化的主要营力之一。在太阳星云凝聚阶段,凝聚物碰撞、吸积形成星子。在太阳星云中不同位置、不同凝聚阶段形成化学组成有所差异的星子,由各类星子吸积组成的地球,形成了原始不均一性的地球。这种原始的不均一性,制约了地球后期的成矿与构造演化。在地球和行星形成的初期阶段,大型星子的撞击,使太阳系各行星垂直于黄道面的自转轴产生不同程度的倾斜。地球自转轴的倾斜对近地空间磁层的分布与形状、地表气候带的分布、生物群落的分布与演化、沉积环境的演变、沉积矿产的形成都具有长期的制约作用。在地球与行星形成的早期,小天体的撞击频率与通量比现今高几个数量级,因而在水星、金星、火星、月球、火卫、木卫等行星与卫星的表面都密布着残存的撞击坑,这是太阳系具有固态表层的行星共有的地貌特征,是行星形成后早期的重要演化营力。地球早期所遭受的地外物体的撞击,不仅诱发大量的火山与岩浆活动,加速地幔的脱气和次生大气圈以及水圈的形成,甚至对地球生命的形成与演化在某种程度上起了重要的催化作用。

地外物体以超速通过大气层并压缩空气,形成超高温高压的冲击波,撞击体本身气化、爆炸、熔融、破碎;冲击波撞击地面产生超强的地震与巨型海啸,使相当于撞击体体积 200 倍的地面岩石气化、熔融、破碎与溅射,挖掘形成撞击坑;大量气化、熔融的尘埃、气溶胶及岩石中释放的气体弥散于平流层,屏蔽太阳辐射,导致气温骤降,黑暗而寒冷的“冬天”降临,植物光合作用受到抑制,致使以植物为主的动物的食物链中断;冲击波使大气分子离解,形成 NO_x , 硝酸酸雨的沉降加速了地面的侵蚀;冲击波使地面大片森林燃烧,甚至诱发全球性大火,森林燃烧产生的烟尘、炭黑及 CO_2 , CO 等组分,弥散于高层大气中,加剧了“黑暗冬天”的影响;地表温度的大幅度降低,使冰盖覆盖面积增大和雪线下降,海平面下降,“白色地球”加剧了地表的降温,甚至形成新的冰期;冲击波还可能诱发大面积火山喷发、甚至产生超壳断裂,增强岩浆活动与成矿作用。撞击作用所产生的一系列滞后效应,使大批生物种属灭绝。随着温室效应的增强,古气候经历了由降温至升温的漫长过

程,新的物种繁衍滋生。撞击作用是地质历史中产生古气候环境灾变、古气候旋回、生物灭绝与新生的主要营力之一。

我们侧重研究了“新生代6次撞击事件及其诱发的气候环境灾变”,主要出于以下几点考虑:①新生代是地球演化历史的最新一页,新生代所发生的巨大撞击事件的影响仍可波及人类的演化,是过去全球变化研究的重要领域,甚至对认识当今的全球变化有重要意义;②由于新生代是地球历史的最新地质时期,后期地质改造作用相对最弱,撞击作用的地质、地球化学记录最易保存和辨识,撞击过程产生的气候、环境信息也易于保存和提取;③新生代曾发生过4次规模不等的(微)玻璃陨石事件。玻璃陨石被公认是地外物体撞击作用使地面岩石气化、熔融、溅射冷却、沉降所形成。我们对全世界的(微)玻璃陨石进行过系统的研究,积累了较丰富的资料,为研究撞击作用导致的灾变环境提供了依据;④第四纪在我国西北形成了巨厚的黄土沉积,由于黄土的沉积速率大(约为海洋沉积速率的10倍),地质记录的分辨率高,后期地质改造作用程度低,为研究新生代撞击作用提供了得天独厚的条件。

发生在新生代的巨大地外物体撞击事件至少有6次:2次界面事件,K/T(65Ma)和T/Q(2.4Ma);4次(微)玻璃陨石事件,分别是北美(微)玻璃陨石事件(34Ma)、捷克斯洛伐克玻璃陨石事件(15Ma)、象牙海岸玻璃陨石事件(1.1Ma)和澳-亚群(微)玻璃陨石事件(0.7Ma)。这几次撞击事件研究程度各不相同,我们的工作侧重也不相同。K/T界线事件是80~90年代全球天体、地球化学工作者研究的热点,其研究集当代天体化学、地球化学、地球物理等的研究方法、分析技术之大成,并积累了丰富的文献资料。结合我们的工作,在书中作了详细的论述。对于北美(微)玻璃陨石事件,由于曾两度进行过国际合作对比研究,并出版过专著,我们未做深入的工作。而2.4Ma,1.1Ma,0.7Ma的撞击事件,前人的研究显得不够系统和深入,是我们研究和分析的重点。经过几年的努力,获得了不少有益的成果,包括首次在中国黄土中发现微玻璃陨石。在对这些具体撞击事件的分析基础上,我们对撞击导致的气候突变进行了理论模拟,提出了撞击产生气候突变的理论模型。

我们研究这些撞击事件的目的,不仅在于了解撞击事件及其导致的古环境变化,更主要的是想通过研究这些撞击事件,认识过去的全球变化,吸取有益的经验,形成撞击与全球变化的理论,用于预防未来可能由撞击导致的环境突变。

本书前言由欧阳自远执笔;第一章由林文祝执笔;第二章由欧阳自远、王世杰和邹永廖执笔;第三章、第四章由王世杰和周磊执笔;第五章、第六章由李春来执笔;第七章由肖志峰执笔;第八章由欧阳自远和王世杰执笔。倪集众负责全书的文字编辑。黄万才绘制了本书部分图件。全书由欧阳自远和王世杰负责统稿和校定。

本研究属“现代核分析技术在环境科学中的应用”重大基金项目中的“新生

代6次撞击事件及其诱发的气候环境突变”课题研究的综合成果,是中国科学院地球化学研究所天体化学研究组全体成员共同努力完成的。本书的出版得到湖北科学技术出版社编辑汪敏同志的大力支持,谨致谢意。

欧阳自远

1996年4月于贵阳

目 录

前 言

第一章 撞击作用的地质和物理化学过程	(1)
一、撞击成坑作用	(1)
(一) 侵彻和挖掘	(2)
(二) 喷射和成坑	(3)
二、冲击变质作用	(4)
(一) 岩石的冲击效应	(5)
(二) 造岩矿物的冲击效应	(8)
三、击变玻璃	(15)
(一) 核爆炸玻璃	(16)
(二) 澳-亚群玻璃陨石母岩和源坑	(21)
(三) 击变玻璃的红外光谱	(22)
四、撞击坑	(28)
(一) 撞击坑形貌特征	(29)
(二) 新生代撞击坑	(32)
第二章 新生代六次巨大撞击作用及其环境效应的一般特征	(35)
一、撞击作用的一般物理图像	(35)
二、撞击事件的微地层学特征	(37)
三、地层界面亲铁元素异常	(40)
(一) 亲铁元素异常	(40)
(二) 亲铁元素异常的扰动现象	(42)
(三) 铂族元素的物理化学性质的影响作用	(43)
四、矿物岩石学特征	(45)
(一) 冲击矿物	(46)
(二) 球粒	(49)
五、撞击诱发的灾变环境	(53)
(一) 均一、无分层的古海洋	(53)
(二) 酸雨	(54)
(三) 毒化的海洋	(55)
(四) 其他	(56)
六、古气候灾变	(57)
七、不同程度的生物灭绝	(60)
(一) 六次撞击与生物圈事件	(60)
(二) 有关 K/T 生物灭绝起因的讨论	(62)

第三章 白垩纪末巨大撞击与古气候灾变	(65)
一、界面 PGE 和其他微量元素异常	(65)
(一)亲铁微量元素异常	(65)
(二)有关界面中其他微量元素异常的讨论	(67)
二、矿物岩石学证据	(72)
(一)球粒	(72)
(二)撞击玻璃	(75)
(三)冲击石英	(76)
(四)炭黑	(77)
(五)纳米级金刚石	(77)
三、Chixulub 撞击坑	(77)
(一)概况	(78)
(二)地质证据	(79)
四、撞击诱发的古气候变化	(81)
(一)靶岩的去气作用	(82)
(二)古气候变化的机制和过程	(82)
五、古气候变化的氧同位素记录	(83)
(一)K/T 剖面的沉积连续性	(84)
(二)两个 K/T 剖面的氧同位素记录	(88)
第四章 2.4Ma 撞击作用和古气候灾变	(94)
一、2.4Ma 前后气候突变的地质地球化学证据	(94)
(一)深海氧同位素记录	(94)
(二)沉积相	(95)
(三)孢粉、微体化石和其他生物化石	(96)
二、2.4Ma 地外物体撞击作用	(97)
(一)Ir 及相关元素的异常	(98)
(二)撞击碎屑	(99)
三、讨论	(100)
第五章 (微)玻璃陨石	(101)
一、概念和特征	(101)
二、分布特征	(102)
三、矿物和岩石学特征	(103)
四、化学成分和化学类型	(103)
(一)玻璃陨石	(103)
(二)微玻璃陨石	(104)
五、微量元素特征	(105)
六、(微)玻璃陨石的年龄	(108)
七、同位素特征	(110)
八、其他方面的研究	(111)
九、玻璃陨石的成因争论	(112)

第六章 黄土中 0.7Ma 微玻璃陨石事件和古气候灾变	(115)
一、黄土堆积物概述	(115)
二、微玻璃陨石和微玻璃球的发现和研究	(116)
(一)微玻璃陨石的研究概况	(116)
(二)微玻璃陨石的赋存层位及年龄	(117)
(三)微玻璃陨石的某些物理性质	(118)
(四)微玻璃陨石和微玻璃球的化学成分	(120)
(五)讨论	(123)
三、微玻璃陨石层记录的古气候灾变事件	(125)
(一)工作剖面 and 样品的描述	(125)
(二)稳定碳同位素	(126)
(三)磁化率异常	(128)
(四)微量元素特征	(130)
(五)粒度分布特征	(132)
四、结论	(134)
第七章 撞击作用与古气候变化模拟	(136)
一、撞击作用的短期气候效应	(136)
二、长期气候变化模拟	(137)
三、撞击作用与大气二氧化碳变化	(139)
(一)K/T 天体撞击与 CO ₂ 含量变化	(140)
(二)其他天体撞击作用与 CO ₂ 含量变化	(142)
四、讨论和结论	(143)
第八章 研究展望	(144)
一、关于撞击成因说与火山成因说的讨论	(144)
(一)争论的焦点	(144)
(二)问题的实质	(145)
(三)发展的趋势	(146)
二、撞击作用与地球演化	(147)
(一)撞击与全球环境演化	(147)
(二)撞击与地球演化	(147)
(三)撞击与大陆的分裂	(148)
(四)撞击与成矿	(148)
参考文献	(149)

第一章 撞击作用的地质和物理化学过程

当代太阳系探测的研究成果表明,不同尺度物体之间的撞击,在太阳系演化中起着极为重要的作用。从太阳星云尘埃低速碰撞形成米级、公里级星子开始,撞击几乎贯穿着太阳系所有的演化阶段和时期。撞击产生的巨大效应非常明显,例如行星在黄道面上具有不同的倾斜度、天王星大尺度倾斜、金星缓慢反向旋转、水星硅酸盐幔缺失和月球的形成;在微小的陨石和宇宙尘矿物中常见有波状消光、破裂、扭结带、冲击页理和矿物重熔等冲击变质作用痕迹;所获得的行星和卫星表面图像显示,在所有具石质和冰质表面的行星和卫星上最常见地貌特征就是撞击坑。

撞击作用最明显和最直接的记录就是撞击坑。早在1609年,伽里略就观察到月球表面布满环形斑点,但这些撞击坑长期以来一直被认为是火山成因。直到1906年,D. M. Barringer 令人信服地证明,亚利桑那的 Meteor 坑是一块大的铁质陨星超速撞击产生的。因此, Meteor 也叫 Barringer 坑。随后又找到 Odessa 坑(得克萨斯,1922)、Kaalijarv 坑(爱沙尼亚,1927)、Botsuntwi 坑(加纳,1932)、Campo del Cielo 坑(阿根廷,1933)等等,但撞击坑真正被人们所认识、接受还是在本世纪中叶以后。由于冲击波技术的发展,有些学者才把撞击引起的变质作用(冲击变质作用)与撞击构造联系起来,从不同领域如冲击波物理、超高压试验、陨石学、天体化学、天体物理、撞击坑地质学和矿物学、岩石学,以及核爆炸试验和月岩研究等给予印证。因此,在本章中,我们将从撞击成坑作用、冲击变质作用、击变玻璃和撞击坑四个方面,详细阐述地外物体撞击作用的地质和物理化学过程。

一、撞击成坑作用

小行星或彗星超速撞击行星及其卫星表面,产生一个撞击构造是一个瞬态的连续过程。从撞击体产生的冲击波与靶体接触开始到靶体碎块抛射运移结束,即使是一个规模相当大的撞击成坑过程也只不过几分钟的时间。以后只是坑缘内坡碎块滑移,缓慢地调整到自然边坡安息角。撞击成坑这一连续过程可以分为以下几个阶段:接触→侵彻→挖掘(爆炸)→喷射→最后成坑。每个阶段均显示出非常不同的物理现象。当撞击体触及靶体表面时,冲击波压碎前进方向上的岩石使撞击体穿入靶体,直到动能受阻为零停止。此时,撞击体动能突然释放爆炸,在靶体内形成一个瞬态空腔,强大的冲击波传入靶体内部,产生冲击变质作用。冲击波通过后,紧随着产生释疏波引起被压缩的靶物质卸荷向相反方向快速流动运移。瞬态空腔内的高温把撞击体及其周围的岩石气化、熔融,接踵而来的是被气化、熔融和压碎的岩石喷射抛出,并向下挖掘成坑。初始喷射速度可达每秒数公里,但由于速度快速衰减使典型的喷射速度仅在100m/s范围。撞击在爆炸这一阶段具有高压、高温、持续时间极短等特征。一个以10km/s

速度飞速而来的直径 10m 的硅酸盐撞击体,这一阶段的持续时间约 10^{-3} s;1km 直径的撞击体,持续时间约 10^{-1} s。

(一) 侵彻和挖掘

设一质量为 m ,速度 v 的钢球撞击各向同性弹性、半无限自由表面,则其侵彻深度为

$$d(t) = vt - \frac{1}{m} \int_0^t F(\tau)(t - \tau) d\tau$$

(1-1)

式中 t 是接触瞬间的时间, $F(\tau)$ 为撞击体与靶体间的接触力。根据公式(1-1),超速撞击体穿入靶体的深度大约为撞击体直径的 1.5 ~ 2 倍。在滞留瞬间,撞击体的内能在极短时间区间内释放发生爆炸,首先将撞击体及其周围物质气化、熔融形成瞬态空腔。极强的爆炸冲击波径向传入靶体,使 200 ~ 300GPa 冲击波压力范围内的岩石完全气化;100GPa 压力范围内的物质完全熔融(表 1.1),瞬态空腔急速膨胀,随之在腔体自由面产生负压的稀疏波把被气化、熔融、粉碎和压碎散裂的物质抛出坑外(图 1.1)。

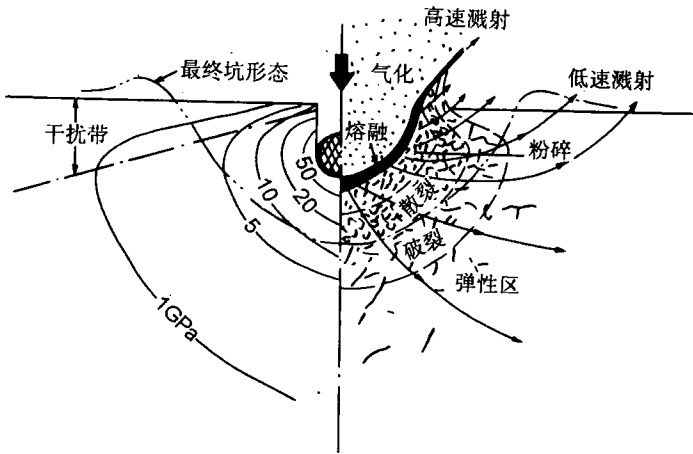


图 1.1 撞击体侵彻和早期喷射示意图

左半边:撞击体侵彻瞬态应力分布;右半边:爆炸力学分区和挖掘成坑

随之在腔体自由面产生负压的稀疏波把被气化、熔融、粉碎和压碎散裂的物质抛出坑外(图 1.1)。图 1.1 左半边表示撞击体侵彻挖掘深度和应力分布;右半边示意早期气化、熔融喷射和力学分区。撞击体侵彻挖掘深度与撞击体的速度、成分、撞击角度和靶体岩石力学强度、地质条件有关。

表 1.1 冲击引起某些岩石熔融、气化的压力值

介 质	压 力(GPa)			
	熔 融		气 化	
	初 始	完 全	初 始	完 全
冰水(-50℃)	3	10	26	≥100
水	—	—	5	约 100
盐岩	35	?	65	280
灰岩	66	?	110	370
大理岩	84	?	130	430
干凝灰岩	43	?	74	260
湿凝灰岩	54	?	90	320
油页岩	73	?	120	400
辉长斜长岩				
低压相	97	110	190	790
高压相	43	52	102	590
铁	220	260	420	1 680

注:资料源于 Melosh, 1989。

接触和压缩阶段,靶体所获得的最大压力远远超过火山爆发和化学爆破。表 1.2 列出一

组撞击体-靶体在给出的速度范围所达到最大的冲击压力。对大多数地质介质,压力在 100 ~ 1 000GPa范围,相应温度可达几万摄氏度,被气化的物质明显离子化。

表 1.2 垂直撞击最大冲击压力

撞击速度 (km/s)	冲击压力 (GPa)		
	铁撞辉长斜长岩	辉长斜长岩撞辉长斜长岩	辉长斜长岩撞冰
5.0	82.5	62.0	29.2
7.5	153.0	99.0	57.1
15.0	481.0	304.0	185.0
30.0	1 950.0	1 010.0	633.0
45.0	3 360.0	2 130.0	1 330.0

注:资料源于 Melosh, 1989。

(二) 喷射和成坑

将被压缩的弹簧一端固定,另一端搁置一物体,当弹簧突然放开时,物体就会被迅速抛出去;受甚高压压缩的物体可被压碎、甚至原子结合键断裂,但并不能使它气化、熔融,只有当压力瞬间卸荷才产生一个与压力方向相反的稀疏波,把压缩体内高聚能的能量突然释放,机械能转化为热能,而导致物体气化、熔融(岩石气化能 $E_{\text{气}} = 3.4 \times 10^3 \text{J/g}$, $E_{\text{熔}} = 1.05 \times 10^3 \text{J/g}$),稀疏波将使失去内聚力的物质产生喷射。由于应力波干扰,在距撞击点水平距离为 s 的近表面质点的喷射速度为

$$v_e = 2u_t(r) \left[1 + \left(\frac{s}{d_{eq}} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \tag{1-2}$$

式中: $u_t(r)$ 是与等效中心的距离 $r = (s^2 + d_{eq}^2)^{\frac{1}{2}}$ 处未被冲击波扰动的质点速度, d_{eq} 是等效中心深度。在近地表区的喷射速度,随深度增加而降低。喷射速度近地表最高,随径向从 10km/s 衰减到 5m/s,中心部位速度最高(图 1.2)。

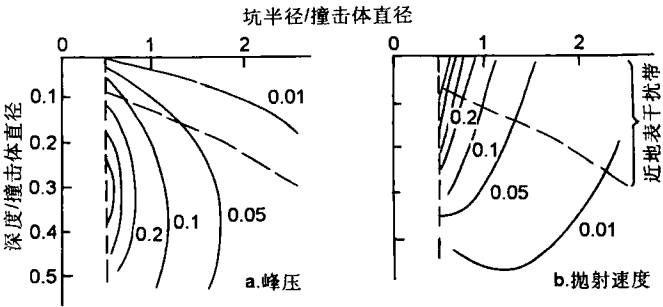


图 1.2 近地表应力波干扰的等峰压力、喷射速度等值线
垂直分量放大 5 倍
(Melosh, 1989)

大部分喷射物均以不同的出射速度和角度向外弹导
抛射、回落堆积在撞击坑周围。由坑缘翻转盖层和回落物组成的截面类似机翅流线型的喷射物盖层。喷射物的弹导抛射距离(R)与出射速度(v_e)和角度(θ)及重力加速度(g)有关。

$$R = (v_e^2/g)\sin 2\theta \tag{1-3}$$

喷射高度 $H = (v_e^2/2g)\sin^2 \theta \tag{1-4}$

喷射物在空中的飞行时间 $T = (2v_e/g)\sin \theta \tag{1-5}$

地球的重力加速度标准参考值 9.8m/s^2 ,在赤道 9.78m/s^2 ,在两极 9.83m/s^2 。从上述公式可以看出,抛射距离、喷射高度及飞行时间均与喷射物质量无关,仅是出射速度和角度的函

数(图 1.3)。根据撞击模拟试验和浅埋核爆炸试验观测,撞击早期喷射是高角度的(大于 70°)。在近 90° 角的喷射速度可达 5km/s ,而大部分高角度喷射的平均速度为 700m/s 。锥角为 40° 的锥体内的喷射物绝大部分是被粉碎的岩石碎屑微粒,若忽略质量影响则不到 2 分钟便进入平流层。远离撞击坑的喷射物盖层主要是由高出射速度、高角度的喷射物组成。撞击的中晚期喷射,由于喷射速度随深度增加而迅速下降,其典型抛射速度为 100m/s ,大部分抛射物是散裂和碎裂的较大岩石碎块。在飞行期间受空气阻力(F)而大大缩短了抛射距离。

$$F = (1/2)\rho[(u + u_0)^2 + V^2]C_dS \quad (1-6)$$

式中: u, V 分别为抛射飞行体的水平和垂直速度分量, u_0 为高空风速, C_d 为阻力系数, S 为飞行物迎面面积, ρ 为高度 H 处的空气密度。从式(1-6)可见,岩块越大,飞行速度越快,空气阻力越大。因此,撞击坑坑缘周围主要堆积着抛射速度较低、低角度($50^\circ \sim 70^\circ$)的较大岩块回落物,如 Meteor, Rise 等撞击坑。根据月坑、地球撞击坑和核试验爆炸坑计算统计,直径 D 小于 15km 撞击坑的坑脊高度为

$$h = 0.036D^{1.014} \quad (1-7)$$

对 D 大于 5km 的月坑:

$$h = 0.236D^{0.399} \quad (1-8)$$

坑周围的连续喷射物盖层延伸半径 R_e 与撞击坑半径 R_c 有如下关系

$$R_e = (2.3 \pm 0.5)R_c^{1.006} \quad (1-9)$$

地球上撞击坑喷射物盖层延伸半径大致为坑半径的 2.3 倍。当冲击波压力衰减到 $15 \sim 20\text{GPa}$ 量级时,被压碎的岩块之间具有较大的附着力而阻止岩块被抛射,构成撞击坑的原始的真正坑底。

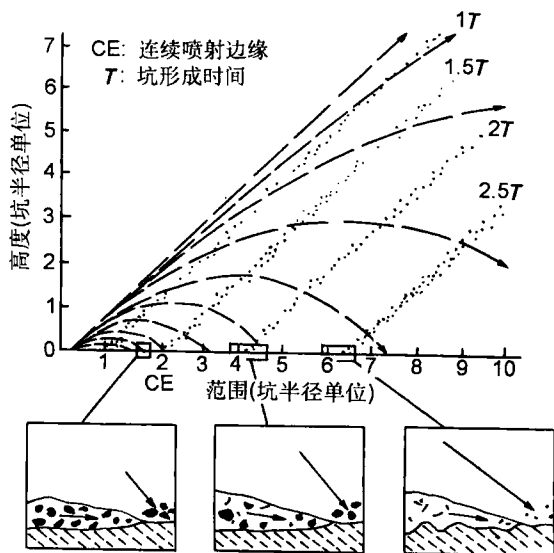


图 1.3 撞击坑岩屑弹导抛射高度和距离

二、冲击变质作用

岩石是一种在结构、矿物成分上分散性很大的天然介质,对力学性质响应从破裂不显著、变形量很大的岩层褶皱,到变形量不明显的脆性破裂。这种脆性、延性蠕变、变形特性完全取决于它所处的物理力学环境如压力、温度和应变率的制约。在实验室,对岩石样品施以足够的围压或温度,可使岩石从脆性破裂转变为延性流变变形。岩石的力学性质对应变率特别敏感,随着应变率提高,岩石的极限强度增加。例如应变率从 3.4×10^{-8} 提高到 4.4×10^{-4} ,花岗岩的极限强度从 159.7MPa 增加到 210.7MPa 。在低应变率荷载情况下,岩石的内部结构缺陷调整起主要作用,有足够的时间将内能耗散于应力松弛;然而,在高应变率($10^4 \sim 10^7$)情况下,如小行星或彗星超速撞击,或核爆炸,几乎所有的岩石类型均表现出脆性破裂特征,以及熔融、气化。由于冲击波在岩体中传播而引起岩石、矿物的车轮式滚动消光、镶嵌结构、微页理、玫瑰状重结晶、震裂锥、矿物多型体、继形玻璃、玻璃陨石、热分解、熔融和气化等一系列变化特征,

称为冲击变质现象。冲击变质(shock metamorphism)在压力、温度和时间等尺度上不同于地质学中的变质作用,具有很高的应变率和一个非常不平衡的热力学环境(表 1.3,图 1.4)。

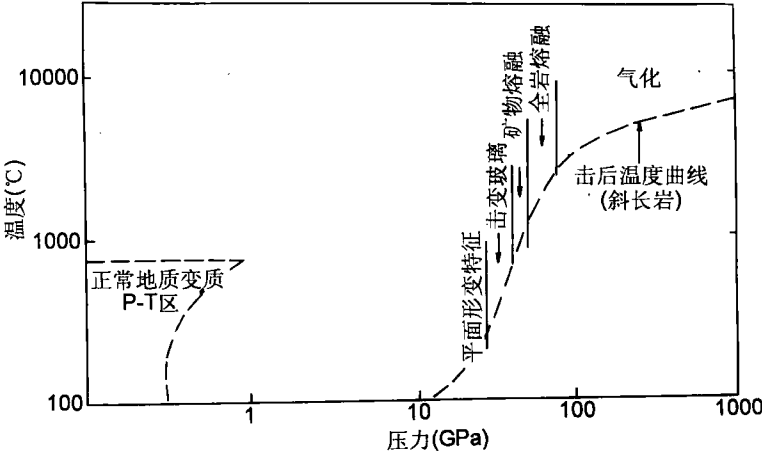


图 1.4 冲击变质和地质内成变质的压力和温度范围

表 1.3 动力变质与冲击变质比较

项 目	动力变质(静载荷)	冲击变质(动载荷)
地质位置	地壳,深 7~35km	行星表面撞击坑
能量来源	造山运动	外来物体超速撞击
压 力	< 1GPa	10~10 ⁴ GPa
温 度	< 10 ³ ℃	≥10 ⁴ ℃
熔体淬火	火山玻璃	击变玻璃
变形持续时间	地质年代,10 ⁵ ~10 ⁷ 年	10 ⁻⁹ ~10 ⁰ s
荷载率	极低	10GPa/μs
岩石变形	变形组构具有优选性方位,蠕变—脆性	不存在优选性方位,脆性破裂,微页理
化学反应条件	共存矿物之间化学反应,岩石多元组分接	共存矿物之间不发生任何化学反应,矿物
	近或达到可能结晶成另一种矿物	成分不变

(一) 岩石的冲击效应

岩石冲击效应通常可以通过矿物来鉴别,但也有它自身的变质特征如高应变率变形,局部或完全玻璃化作用,选择性相变,难熔矿物和副矿物的崩溃或熔融和亲铁元素异常。下面介绍几种常见的岩石冲击效应产物。

1. 击变岩

击变岩一词,在不同国家有不同名称,如 Suevite (Ries 坑), Impactite (Cherlevoix 坑), Karnaite, dellenite 和 rhyolite (北欧),均是指一种含有各冲击阶段的变质作用产物,富含玻璃的回落集块熔岩或角砾岩(表 1.4)。它与火山玻璃集块岩不同在于含高压相矿物,局部保存着岩石的原始结构,选择性熔融和已软化的岩块具有流动构造和气泡。击变岩块含有大量次生热蚀变作用和沸石化作用产物,没有斑晶,玻璃中有大量退火结构的细颗粒。击变岩主要存在于撞击坑回落沉积物中,呈透镜体,上伏回落的角砾岩和现代沉积,或分散在坑周围(照片1.1)。

表 1.4 各冲击变质阶段的冲击效应

阶 段	冲 击 效 应	压 力 (GPa)	击后温度 (℃)
0	破碎作用;镶嵌作用,波状消光,石英中变形带,云母扭结带,震裂锥	0 ~ 10	0 ~ 100
I	石英微页理;长石、闪石辉石变形双晶;斯石英,柯石英;云母扭结	10 ~ 35	100 ~ 300
II	击变石英,长石玻璃闪石,辉石中变形双晶云母扭结	35 ~ 45	300 ~ 900
III	富钠长石中选择性熔融击变石英玻璃,云母和闪石热分解	45 ~ 60	900 ~ 1 300
IV	岩石完全熔融(花岗质成分)	60 ~ 80	1 500 ~ 3 000
V	气化作用	> 80	> 3 000



照片 1.1 Meteor 坑沿的岩石巨砾和碎块

2. 撞击玻璃熔体

从表 1.4 可以看出,冲击波压力超过 60GPa 以上将产生非晶质熔体。同一撞击事件的玻璃熔体化学成分基本相同,是靶体不同岩性按其所占比例的混合熔融。玻璃熔体的 REE 模式反映出其母岩的特性,并表明岩石在瞬态高温高压下不发生化学分异作用,只有物态的相变。表 1.5 列出了撞击熔体玻璃与普通玻璃比较。

表 1.5 撞击熔体玻璃与标准玻璃比较

击变熔体玻璃	标准玻璃
(1)部分保存原始结果晶态,特征如:颗粒界线,双晶界线和压碎	形态由表面张力而定
(2)折光率、密度比同成分标准玻璃高	结晶相和标准玻璃之间不出现过阶段
(3)通常含有高压相矿物	

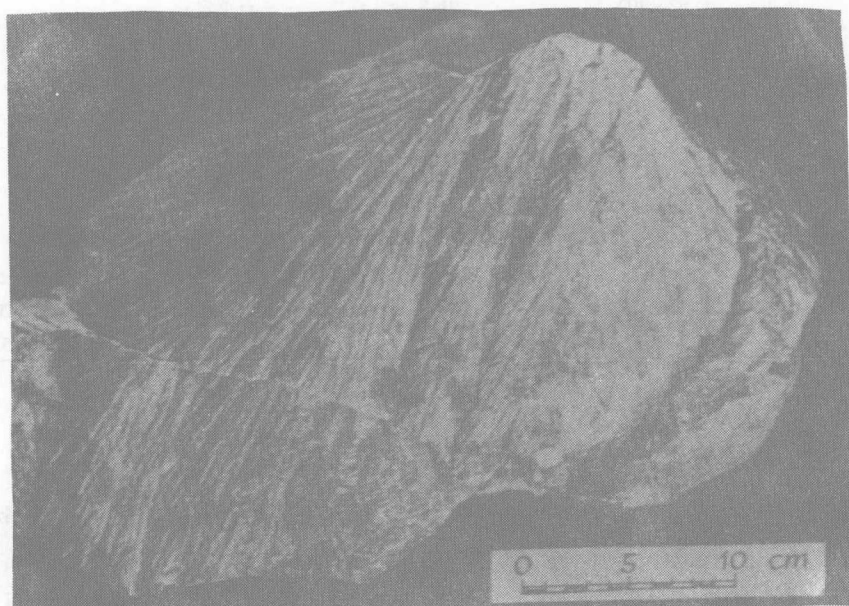
3. 碎斑结构

在冲击变质零阶段的压力范围内,岩块的磨光面常常可见到密集的粉碎性脆性破裂。它由大小不一的碎块彼此镶嵌,在结构介面附着力作用下使岩块不至散碎,但强度很低。经后期

细颗粒物质充填胶结形成不规则的网状细脉,细脉约占 50% 体积。致密的微结晶质岩屑常常重结晶。具有冲击碎斑结构的岩块通常分布在坑底、坑唇或复杂坑中心隆起区。

4. 震裂锥

震裂锥是高应变率条件下,岩石中出现一种非常特殊的结构构造。它的形成机制目前仍然不清楚。震裂锥呈正圆锥形,锥面常附有辐射状(或马尾状)凹凸条纹沟,凸起部分表面略显圆弧,沟槽为三角形(照片 1.2)。有些震裂锥表面还附有叠式次生锥体,但不具有地质构造中的叠锥构造之横向脊和纤维结构。



照片 1.2 Steinheim 坑的震裂锥

震裂锥大小从小于 1cm 到十几米。锥角通常为 $66^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 之间(叠锥张角平均为 45°)。岩石的不均一性可以改变震裂锥的大小、条纹间距、完整性和重叠性。一般来说,隐晶质的、致密的、软的岩石更容易出现震裂锥。细颗粒致密岩石(如碳酸岩)的锥体较尖,锥面条纹细密。

大量野外观察表明,大多数震裂锥出现在两种岩性接触面,或同一岩性层理面之下,锥尖顶着接触面并指向撞击坑中心,锥轴垂直于冲击波波阵面。因此,可通过锥尖指向来判断撞击点位置(侵彻深度)。在距坑中心相同距离上,震裂锥有见于某种岩性而在另一种岩性中不出现的现象。震裂锥通常分布在复杂坑中心地区的岩石的破裂带边缘,据推算形成压力为 2 ~ 8GPa(表 1.6)。

地下或触地核爆炸试验、大型化学爆炸及冲击回收试验,均有震裂锥构造出现。这不仅有用地说明震裂锥是冲击波作用引起的,而且还可以确定震裂锥形成的压力范围,借以研究撞击坑的应力场分布。

表 1.6 震裂锥产状

冲击构造	角度分布(度)	平均值(度)	岩 性	距坑中心距离(km)
Gosses	66 ~ 96	80.2 ± 6.1	砂 岩	3.5 ~ 6.5
Hermannsbury	71 ~ 83	78.1 ± 6.1	砂 岩	5
Harojieca	66 ~ 93	78.4 ± 5.9	砂 岩	3.9
Mercenic	71 ~ 96	82.4 ± 5.4	砂 岩	3.8
Carmichael	75 ~ 96	80.5 ± 9.3	砂 岩	3.8
Stairway	81 ~ 89	85.2 ± 2.9	硬质砂岩	3.8
Charlevoix	70 ~ 112			12 ~ 15
Ordovician	70 ~ 98	87.2	灰 岩	
	82 ~ 108	90.6	长石砂岩	
	82 ~ 102	91.8	石英岩	
Precombrian	82 ~ 113	94.2	紫苏花岗岩	
	84 ~ 122	99.6	花岗片麻岩	
Jeppetown	94 ~ 100		粗砂石英岩	
Series	90		变闪长岩	
	98		碱性花岗岩	
Reef Series	100		纯石英岩	
	91		泥质石英岩	
Seivra Madem	76 ~ 108	88.5	白云岩	1 ~ 5
Manicouagan	85		片麻岩	约 20
Lonar	72		玄武岩	0.5

(二) 造岩矿物的冲击效应

造岩矿物在冲击波作用下可产生各类残余效应,显示出冲击压缩下动弹性模量和相变矿物的雨贡纽曲线特征。但也不是所有矿物在冲击波作用下,均具有一条完整的雨贡纽曲线和产生相应的可能的残余冲击效应。矿物的雨贡纽曲线形状表示它的动态压缩性,直接与矿物晶体结构或堆积密度、经受多晶态相变的能力等有关。如低堆积密度(低对称晶格)的架状硅酸盐在低压相较大部分致密堆积的辉石、橄榄石有更大的压缩率,在混合相也显示出异常的压缩性。因此,在同一压力下不同矿物或同一矿物结晶轴与波阵面交角的不同均显示出不同的击后效应。对多晶共存情况,就可能有些矿物已完全相变,而另一些仅出现部分相变。另外,还可以通过冲击矿物瞬态的压力-时间,温度-时间剖面来了解冲击波波阵面的物理过程和传播的几何形状,以及受击矿物的屈服、相变等物理性质。与此同时,也可通过这些性质来确定波阵面的稳定性或可能的应力松弛效应。

随着冲击压力的增加或不同压力下释放,可以观察到以下主要由冲击波作用留下的残余效应。

1. 破裂

在雨贡纽弹性区和混合相区的很宽压力范围内,所有受冲击的矿物中均能观察到不规则破裂。虽然不能作为特定压力的指示,但能显示出动态压缩过程留下的残余效应。这方面可以通过实验室试验不同压力下单位面积的破裂数的镜下测量来建立破裂强度指数和校正峰压。